

## КОРОТКОЗАМКНУТЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С РАЗДЕЛЕННЫМ НА ЧАСТИ ПАКЕТОМ РОТОРА

Асинхронные двигатели, имеющие несколько пакетов на роторе с различными параметрами короткозамкнутых клеток, как отмечалось нами в [1, 2], вызывают интерес из-за ряда их преимуществ: уменьшения добавочных потерь, изменения вибрационных характеристик, улучшения механических характеристик.

В [1, 2] приведены аналитические соотношения и расчетная схема двигателя с одним дополнительным короткозамкнутым кольцом на роторе для расчета двигателя по первой гармонике магнитного поля. Показано, что инженерный расчет по первой гармонике такого двигателя можно производить как расчет двигателя с одной эквивалентной к.з. обмоткой на роторе без уравнительных колец.

В настоящей статье на основе тех же физических представлений рассматривается двигатель с произвольным числом пакетов на роторе.

Пусть для определенности ротор имеет три пакета с общей короткозамкнутой обмоткой, разделенной на три части двумя дополнительными кольцами (рис. 1). Длина пакетов, количество в них пазов и сечение стержней в общем случае могут быть различными.

Для такого двигателя после приведения роторных величин к статорной обмотке получают следующие уравнения напряжения:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= r_1 \dot{I}_1 + jx_1 \dot{I}_1 + jx_m \dot{I}_1 + j\alpha x_m \dot{I}_2 + j\beta_1 x_m \dot{I}_3 + j\beta_2 x_m \dot{I}_4; \\ 0 &= \frac{r_2}{s} \dot{I}_2 + jx_2 \dot{I}_2 + j\alpha x_m \dot{I}_2 + j\alpha x_m \dot{I}_1 + \frac{r_{\Delta 1}}{s} (\dot{I}_2 - \dot{I}_3) + jx_{\Delta 1} (\dot{I}_2 - \dot{I}_3) + \\ &\quad + \frac{r_{\Delta 2}}{s} (\dot{I}_2 - \dot{I}_4) + jx_{\Delta 2} (\dot{I}_2 - \dot{I}_4); \\ 0 &= \frac{r_3}{s} \dot{I}_3 + jx_3 \dot{I}_3 + j\beta_1 x_m \dot{I}_3 + j\beta_1 x_m \dot{I}_1 + \frac{r_{\Delta 1}}{s} (\dot{I}_3 - \dot{I}_2) + \\ &\quad + jx_{\Delta 1} (\dot{I}_3 - \dot{I}_2) + jx_{\Delta 4} \dot{I}_4; \end{aligned} \quad (1)$$

$$0 = \frac{r_1}{s} \dot{I}_4 + jx_4 \dot{I}_4 + jx_m \dot{I}_4 + j\beta_2 x_m \dot{I}_1 + \frac{r_{d2}}{s} (\dot{I}_4 - \dot{I}_2) + \\ + jx_{d2} (\dot{I}_4 - \dot{I}_2) + jx_{43} \dot{I}_3,$$

где

$$\alpha = \frac{l_2}{l_2 + l_3 + l_4}; \quad \beta_1 = \frac{l_3}{l_2 + l_3 + l_4}; \quad \beta_2 = \frac{l_4}{l_2 + l_3 + l_4}; \quad (2) \\ (\alpha + \beta_1 + \beta_2 = 1)$$

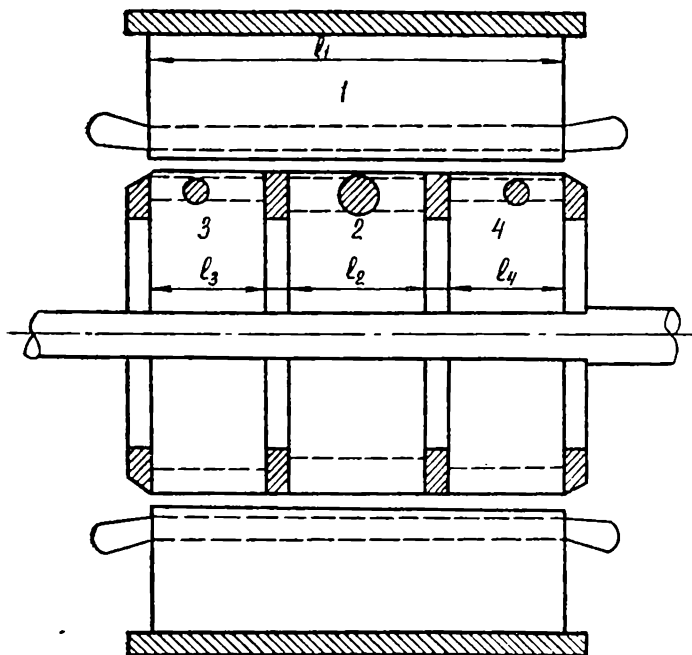


Рис. 1. Двигатель с трехпакетным ротором.

- $x_1, x_2, x_3, x_4$  — сопротивления рассеяния соответственно статорной обмотки, частей 2, 3, 4 обмотки ротора;  
 $r_1, r_2, r_3, r_4$  — активные составляющие сопротивлений статорной и частей 2, 3, 4 роторной обмоток;  
 $x_m$  — полное реактивное сопротивление взаимной индукции обмотки статора;  
 $x_{d1}, x_{d2}$  — реактивные сопротивления взаимной индукции дополнительных короткозамкнутых колец;  
 $r_{d1}, r_{d2}$  — активные сопротивления дополнительных короткозамкнутых колец;  
 $x_{34}, x_{43}$  — сопротивление взаимной индукции между частями 3 и 4 (см. рис. 1) обмотки ротора;

$\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3, \dot{I}_4$  — токи соответственно в статорной и в частях 2, 3, 4 роторной обмотках;

$\dot{I}_{д1}, \dot{I}_{д2}$  — токи в дополнительных короткозамкнутых кольцах;  
 $s$  — скольжение ротора.

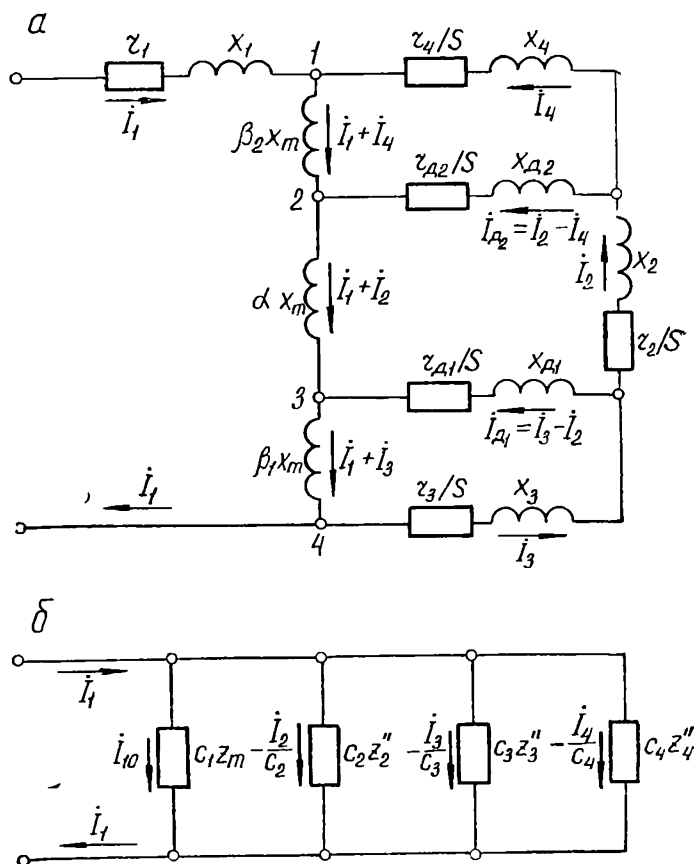


Рис. 2. Схемы замещения двигателя с трехпакетным ротором:  
 $a$  — исходная;  $б$  — преобразованная.

В системе уравнений (1) сопротивления взаимной индукции  $x_{34}$  и  $x_{43}$  учитывают весьма несущественную магнитную связь между крайними частями обмотки ротора. В целях получения более простых соотношений в дальнейшем будем считать  $x_{34} = x_{43} = 0$ .

Тогда системе (1) будет соответствовать схема замещения электродвигателя, приведенная на рис. 2,  $a$ . В схеме не учитываются потери в стали, они могут быть учтены введением в нее

трех активных сопротивлений, присоединенных к точкам 1—2, 2—3, 3—4.

В общем случае при  $n$  дополнительных колец на роторе будем иметь  $n+1$  уравнений для приведенных к статору роторных контуров. Учитывая только связи между смежными контурами роторной обмотки, получим аналогичную рис. 2, а схему замещения двигателя с  $(n+2)$  контурами, изображенную на рис. 3.

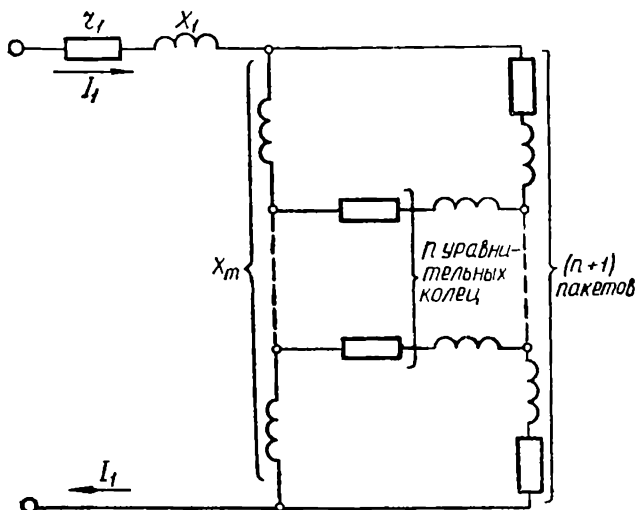


Рис. 3. Схема замещения двигателя с произвольным числом дополнительных к. з. колец на роторе.

Соотношение для электромагнитной мощности двигателя с трехпакетным ротором имеет вид:

$$P_{э.м} = \frac{m_1 r_2 I_2^2}{s} + \frac{m_1 r_3 I_3^2}{s} + \frac{m_1 r_4 I_4^2}{s} + \frac{m_1 r_{д1} I_{д1}^2}{s} + \frac{m_1 r_{д2} I_{д2}^2}{s}, \quad (3)$$

где  $I_{д1} = (I_2 - I_3)$ ;  $I_{д2} = (I_2 - I_4)$  — токи в дополнительных кольцах.

Для расчета приведенных токов  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_4$  в частях 2, 3 и 4 обмотки ротора схему рис. 2, а целесообразно преобразовать. Обозначим:

$$\begin{aligned} z_1 &= r_1 + jx_1; \quad z_2 = \frac{r_2}{s} + jx_2; \quad z_4 = \frac{r_4}{s} + jx_4; \quad z_m = jx_m; \\ z_3 &= \frac{r_3}{s} + jx_3; \quad z_{д1} = \frac{r_{д1}}{s} + jx_{д1}; \quad z_{д2} = \frac{r_{д2}}{s} + jx_{д2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Введем коэффициенты:

$$C_1 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_{20} + \dot{U}_{30} + \dot{U}_{40}} = 1 + \frac{z_1}{z_m} \approx 1 + \frac{x_1}{x_m}; \quad C_2 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_{20}} = \frac{z_1 + z_m}{\alpha z_m} = \frac{C_1}{\alpha}; \quad (5)$$

$$C_3 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_{30}} = \frac{z_1 + z_m}{\beta_1 z_m} = \frac{C_1}{\beta_1}; \quad C_4 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_{40}} = \frac{z_1 + z_m}{\beta_2 z_m} = \frac{C_1}{\beta_2},$$

где  $\dot{U}_{20}$ ,  $\dot{U}_{30}$ ,  $\dot{U}_{40}$  — напряжения между точками 2 и 3; 3 и 4; 1 и 2 схемы рис. 2, а при разомкнутых контурах ротора.

Из первого уравнения системы (1) с учетом (4) и (5) следует:

$$\frac{\dot{U}_1}{z_1 + z_m} = \dot{I}_1 + \frac{\alpha}{C_1} \dot{I}_2 + \frac{\beta_1}{C_1} \dot{I}_3 + \frac{\beta_2}{C_1} \dot{I}_4. \quad (6)$$

Величина

$$\dot{I}_{10} = \frac{\dot{U}_1}{z_1 + z_m} = \frac{\dot{U}_1}{C_1 z_m} \quad (7)$$

представляет собою ток статора при синхронной скорости вращения ротора.

Обозначая через

$$\dot{I}_2'' = \frac{\dot{I}_2}{C_2}; \quad \dot{I}_3'' = \frac{\dot{I}_3}{C_3}; \quad \dot{I}_4'' = \frac{\dot{I}_4}{C_4},$$

получим из (6) и (7) уравнение токов

$$\dot{I}_{10} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2'' + \dot{I}_3'' + \dot{I}_4''. \quad (8)$$

В соответствии с полученным соотношением (8) схему, эквивалентную рассматриваемому электродвигателю, можно представить в виде четырех независимых параллельных цепей (рис. 2, б). Второе, третье и четвертое уравнения системы (1) после подстановки в них тока  $\dot{I}_1$  из (8) и  $\dot{I}_{10}$  из (7) с учетом (4) и (5) дают следующие уравнения:

$$\begin{aligned} -\dot{I}_2 z_{20}'' + \dot{I}_3 z_{32}'' + \dot{I}_4 z_{42}'' &= \dot{U}_1; \\ \dot{I}_2 z_{23}'' - \dot{I}_3 z_{30}'' + \dot{I}_4 z_{m14}'' &= \dot{U}_1; \\ \dot{I}_2 z_{24}'' + \dot{I}_3 z_{m13}'' - \dot{I}_4 z_{40}'' &= \dot{U}_1; \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$z_{20}'' = \alpha z_m (C_2 - 1) + C_2 (z_2 + z_{д1} + z_{д2}) = z_1 + (1 - \alpha) z_m + C_2 (z_2 + z_{д1} + z_{д2});$$

$$z_{30}'' = \beta_1 z_m (C_3 - 1) + C_3 (z_3 + z_{д1}) = z_1 + z_m (1 - \beta_1) + C_3 (z_3 + z_{д1});$$

$$z_{40}'' = \beta_2 z_m (C_4 - 1) + C_4 (z_4 + z_{д2}) = z_1 + z_m (1 - \beta_2) + C_4 (z_4 + z_{д2});$$

$$z_{23}'' = \alpha z_m + C_3 z_{д1}; \quad z_{24}'' = \alpha z_m + C_4 z_{д2}; \quad z_{m13} = \beta_1 z_m;$$

$$z_{32}'' = \beta_1 z_m + C_2 z_{д1}; \quad z_{42}'' = \beta_2 z_m + C_2 z_{д2}; \quad z_{m14} = \beta_2 z_m.$$

Система (9) может быть решена относительно токов  $I_2$ ,  $I_3$  и  $I_4$ .

Практический интерес представляет случай симметричного ротора, в котором длины  $l_3$  и  $l_4$  крайних пакетов, сопротивления частей 3 и 4 обмотки, а также крайние закорачивающие кольца и параметры дополнительных колец одинаковы. Это позволяет [3] улучшить теплообмен с внешней средой и распределение магнитного поля в зазоре в осевом направлении.

В этом частном случае (что можно показать путем несложных преобразований вышеприведенных соотношений) две идентичные крайние части обмотки ротора можно заменить одной эквивалентной цепью с удвоенными по величине параметрами, а два дополнительных кольца заменяются одним, также с удвоенным сопротивлением. Обозначая  $z_{111} = z_3 + z_4$ ;  $z_{д9} = z_{д1} + z_{д2}$ ;  $C_{111} = \frac{C_3}{2} = \frac{C_4}{2}$  и учитывая идентичность крайних пакетов, т. е. равенства  $z_3 = z_4$ ;  $z_{д1} = z_{д2}$ ;  $C_3 = C_4$ , получим следующие аналитические формулы для токов:

$$\begin{aligned} -I_2 &= \frac{\dot{U}_1}{\frac{z_{20}'' - z_{2111}'' \frac{z_{1112}''}{z_{1110}''}}{1 + \frac{z_{1112}''}{z_{1110}''}}}; \\ -I_{111} &= -I_3 = -I_4 = \frac{\dot{U}_1}{\frac{z_{1110}'' - z_{1112}'' \frac{z_{2111}''}{z_{20}''}}{1 + \frac{z_{2111}''}{z_{20}''}}}, \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$z''_{20} = z_1 + (1 - \alpha) z_m + C_2(z_2 + z_{д.э}); \quad z''_{III0} = z_1 + \alpha z_m + C_{III}(z_{III} + z_{д.э}); \\ z''_{2III} = \alpha z_m + C_{III} z_{д.э}; \quad z''_{III2} = (1 - \alpha) z_m + C_2 z_{д.э}.$$

Выражения для электромагнитной мощности (3) и токов в частях 2, 3, 4 обмотки ротора (10), а также схемы — эквивалентная (рис. 2, а) и замещения (рис. 2, б) — примут вид, подобный выражениям и схемам двигателя с одним дополнительным кольцом на роторе [1, 2].

## ВЫВОДЫ

1. Двигатель с произвольным числом дополнительных к.з. колец на роторе достаточно точно может быть представлен электрической схемой замещения, в которой не учитывается лишь взаимоиндукция несмежных частей обмотки ротора.

2. Трехпакетный ротор с двумя одинаковыми дополнительными кольцами и идентичными частями обмотки в крайних пакетах приводится к эквивалентному ротору с одним дополнительным кольцом, что позволяет значительно упростить расчет параметров и механической характеристики двигателей с подобным ротором.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Бреев, В. Ю. Сродных. Асинхронный двигатель с дополнительными короткозамкнутыми кольцами на роторе. Тр. УПИ, сб. 181, Свердловск, 1970.

2. В. Н. Бреев, В. Ю. Сродных. К расчету асинхронного двигателя с дополнительными короткозамкнутыми кольцами на роторе. Тр. ППИ, сб. 62, Пермь, 1969.

3. В. Н. Бреев, В. Ю. Сродных. Короткозамкнутый ротор асинхронного двигателя. Авторское свидетельство № 202310 с приоритетом от 12 марта 1966 г. «Изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», 1967, № 19.

---